

京都大学大学院工学研究科
社会基盤工学専攻修士論文
令和8年2月



Master's Thesis
Department of Civil and Earth Resources Engineering
Graduate School of Engineering
Kyoto University
February 2026

Refraction-Aware Gaussian Splatting for Shallow Water Bathymetry from UAV Imagery

京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻

空間情報学講座

宇野 大輝

論文要旨

水中の3次元地形の計測は水深測量(Bathymetry)と呼ばれている。浅水域においても、河床・海底の水深測量は、地形変動のモニタリング、ハザードシミュレーション、および水生生物の生息環境評価において極めて重要である。近年、無人航空機(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)を用いた写真測量(Photogrammetry)は、広範囲を効率的に調査する手法として注目されている。しかし、空中から水底を撮影する際、水面で発生する光の屈折が、従来の写真測量における幾何学的仮定(共線性条件)を根本的に破綻させるという課題がある。既存の手法は、屈折を完全に正確に物理的正確性を持ってモデル化しない経験的な補正や反復的な後処理に依存するか、あるいは説明可能性を欠くブラックボックス的な深層学習モデルを用いるものが多く、形状の幾何学的忠実性と外観の写実性を両立させることは困難であった。

本論文では、この課題を解決するために、物理的に忠実な二媒質屈折モデルを再構成パイプラインに直接組み込んだ“Refraction-aware 3D Gaussian Splatting”を提案する。本手法の核心的な貢献は、水中の真の位置にある3D Gaussianを、航空画像上の見かけの位置へと解析的にマッピングする微分可能なパラメータ変換の導入にある。これにより、標準的な3D Gaussian Splattingの柔軟なフレームワークを維持しつつ、屈折あり画像からの密な3次元形状と詳細なテクスチャ情報の復元を実現した。

評価実験では、屈折以外の光学的要因を排除し厳密な検証を行うため、物理ベースのレイトレーシングにより生成された河床のシミュレーションデータセットを用いた。その結果、水深10 mのスケールにおいて許容誤差10 cmとした場合の幾何学的F1スコアは96%を達成した。さらに、新規視点合成(Novel View Synthesis)においては、PSNR 25.9 dB、SSIM 0.93という詳細な屈折なし画像の推定を達成した。提案手法により、平坦な水面条件下において、河川、湖沼、沿岸域の低コストかつ高頻度な3Dモニタリングが可能となり、水域リモートセンシング分野に新たな方法論的基盤を提供する。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究課題	2
1.3 研究の目的と貢献	2
1.4 論文構成	3
第2章 関連研究	4
2.1 水深測量の概要	4
参考文献	6

第1章 序論

1.1 研究背景

地球表面の大部分を覆う水域、特に沿岸部や河川などの浅水域(Shallow Water)は、人間社会の経済活動、防災、生態系保全において極めて重要な役割を果たしている。河川管理における氾濫原の地形変状把握 [1]、沿岸域管理 [2]、生態系の生息環境評価 [3] など、水底の詳細な地形データを観測する水深測量(Bathymetry)は非常に重要である。しかしながら、これらの領域は従来の測量技術では取得が困難な空白地帯となりがちであった。

伝統的な船舶搭載型マルチビームソナー(深浅測量・音響測深)は、一定の深度がある海域においては標準的な手法であるが、水深が極めて浅い河川や海岸線付近においては、船舶の座礁リスクなどの航行不可領域の存在により、その運用は著しく制限される。近年では、小型の無人水上艇(Unmanned Surface Vehicle: USV)を用いた水深測量が注目されているが [4·5]、マルチビームの指向角の制限により、浅水域においては走査幅(Swath Width)が狭く、面的な測量を行うには時間的コストが高くなるという、非効率性の問題も生じる。一方で、航空機搭載レーザ測深(ALB: Airborne LiDAR Bathymetry)は [6]、広域かつ高精度な計測が可能であるが、導入および運用コストが極めて高く、高頻度なモニタリングには不向きであるという経済的な障壁が存在する。

こうした背景の中、近年急速に普及したドローンなどの無人航空機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)を用いた写真測量(Photogrammetry)は、低コストかつ高解像度、高頻度なデータ取得が可能であることから、次世代の浅瀬測量技術として大きな期待を集めている。UAVにより空撮された多視点画像から、Structure-from-Motion (SfM) [7]、および Multi-View Stereo (MVS) [8·9] を用いて3次元形状を復元するアプローチは、陸部においては既に広い用途で実用化されている [10·11·12]。これらの技術を水中に適用する場合、その手法は空中からの水深写真測量(Photogrammetric Bathymetry)と呼ばれ、空中から撮像した多視点画像からの水中の三次元再構成問題と捉えることができる。水深写真測量には、光の反射や、水中での光の散乱・吸収による減衰、波による被写体の歪みなどの課題が存在するが、中でも最も根本的に重要な課題として取り組まれてきたのが光の屈折(Refraction)である。

1.2 研究課題

既存の SfM・MVS アルゴリズムの大部分は、幾何光学 (Geometry Optics) を前提としている。すなわち、撮像 (Image Sensing) のプロセスにおいて、観測対象となる被写体から発せられる光は、被写体からカメラ中心まで直進することを仮定する。しかし、UAV による水中撮影においては、光は水中から空气中へ進む際に、水面と異なる媒質の境界でスネルの法則 (Snell's Law) に従って屈折する。この物理現象によって、カメラから見た被写体の「見かけの位置」(Apparent Appearance) は、実際の位置よりも浅く、近く、歪ませる。屈折の影響を無視し、既存の SfM・MVS アルゴリズムを適用する場合、水深が実際よりも浅く評価される。これに対処するために、従来は SfM・MVS の出力結果に屈折率に基づく補正を適用する手法 [13-14] や、点群とカメラフレームの位置関係から推定する手法 [15-16]、手動で計測した数カ所の真値をもとに出力結果の補正率を回帰で決定する手法 [<empty citation>] が提案されてきた。こうした手法は、屈折の影響を補正する一方で、屈折の物理的特性を完全にモデル化しているわけではなく、視線角度依存性や多視点間の整合性を厳密に扱えないため、幾何学的精度には限界があった。直近では、[17] が、屈折の物理的特性を直接 SfM の最適化に組み込むことで、より高精度な再構成を実現する手法を提案している。しかし、この手法では、疎な出力結果を補うために、USV など高いコストを要する計測機器を用いた測量結果を用いた深層学習手法で補間する [18] 必要があり、学習データ不足とフィールド依存性という問題がある。

さらに、近年のコンピュータビジョン (Computer Vision)・コンピュータグラフィックス (Computer Graphics) の領域では、Neural Radiance Fields (NeRF)[19] や 3D Gaussian Splatting (3DGS) [20] といった、微分可能なレンダリング (Differentiable Rendering) を用いた新たな 3 次元表現・再構成手法が登場している。これらは任意視点における写真のようなリアルな新規視点合成 (Novel View Synthesis:NVS)において卓越した性能を示し、照明依存性、時間軸方向へ拡張、幾何情報の抽出といった多種多様な課題を克服するよう、日進月歩の進化を遂げている [<empty citation>]。特に、NeRF のような陰的三次元表現 (Implicit Representation) は計算コストが高く、幾何的な走査や解釈が容易ではない一方、3DGS は明示的な三次元 Gaussian 点群表現 (Explicit Representation) を持ち、高速かつ直接的な形状操作が可能であるという利点を持つが、空气中から観測する水中屈折を考慮した定式化は未だ十分になされていない。

1.3 研究の目的と貢献

以上の背景から、本修士論文では、UAV 空撮画像からの水中 3 次元復元において、物理的な屈折モデルを Gaussian Splatting(GS) のパイプラインに直接統合することで、幾何学的正確性と写実的な外観再現を両立させる新たな枠組み (Refractive-Aware Gaussian Splatting) を提案・実証する。本手法の核心的な貢献は、水中の真の位置にある 3D Gaussian を、UAV 空撮画像中の見かけの位置へと解析的にマッピングするパラメータ変換にある。この変換は、微分可能であるたり、GS の最適化過程に直接組み込むことで、屈折を含む入力画像から直接、屈折のない三次元シーン (3D Scene) を推定し、屈折の影響

を排した密な3次元形状と詳細なテクスチャ情報の復元を実現する。

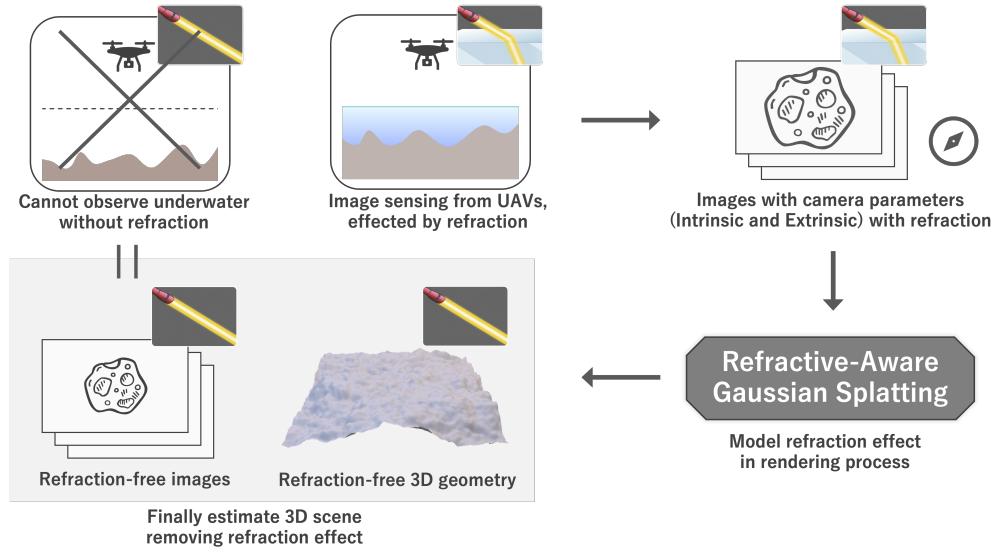


図 1-1: 空気中からの水深写真測量のタスクの概要。空中から水底を撮像したパラメータ既知の多視点画像を入力として、Refractive-Aware Gaussian Splatting を用いることで、屈折の影響を排除した水中の三次元シーンを再構成する。

検証においては、PBR レンダリング (Physically-Based Rendering:PBR) によってシミュレートされた合成データと実データの双方を用いて検証を行った。合成データでは、不観測地点からの再構成 3D モデルの視覚的品質を指す Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) が 25 dB を超え、提案手法から抽出した幾何情報では真値との幾何的復元精度を表す F1 スコア (F1-score) で 94% を超える結果を確認した。(合成データは深度 10 m、撮影高度 10 m のスケールである。完全に平面の水面とカメラパラメータ既知を仮定し、屈折の影響のみを考慮し、反射や減衰、波など屈折以外の物理的影響は除外している。F1 スコアは許容誤差 10 cm とした。) 実データにおいても、幾何的誤差 を確認するなど、実用的な空中からの水深写真測量としての方法を確認した。

1.4 論文構成

本論文は導入部である第 1 章を含め、全 6 章で構成される。第 2 章では、水深測量の概要と諸手法といった関連研究に関して述べる。第 3 章では、本研究の基盤となる Gaussian Splatting やコンピュータビジョンの諸手法の学術的背景と理論に関して記述する。第 4 章では、提案手法である Refractive-Aware Gaussian Splatting の詳細な理論と実装に関して記述する。第 5 章では、検証において用いた合成データと実データの双方を用いて、提案手法の性能を定性・定量的に検証する。第 6 章では、研究の課題 (Limitation) と今後の課題 (Future Work) に関して述べ、研究の統括を行う。

第2章 関連研究

2.1 水深測量の概要

水深写真測量は重要だよ。地球の7割が水域だよ。にも関わらず、水底の詳細な地形データを観測する水深測量は大変で、海底のことは、宇宙や月のことよりも分からぬと言わわれがちだよ。近年 Seabed 2030 のような活動によって、地球の全域を測量しようとする気運が高まっているよ。(最近読んだ深海の地図をつくる? みたいな本を参照したいよ) それらはマルチビームソナーによる深浅測量によって行われるよ。これは音響測深とも呼ばれるように、水中の音波を用いて水深を測量する手法であるよ。(一般的なセンシングで用いられる電磁波は、真空や薄い空気中では伝搬し情報を伝えられるが、水中では媒質が水であるため、その水中で減衰しにくい情報を使用するしかないのだ。的なことをかっこよく述べていよ) 昔は鎖を下ろして、航海という人類の活動の基盤の一つで、船の座礁などのリスクを管理する重要な海の地図だけど、それを作るのはたいへんやった。(歴史) 昔は、地点ごとに鎖を下ろして、深さを図るなど、一地点で半日かかりだった。(って本に書いてたけど、何を参照しよう)。その後、シンクルソナーマルチビームにより、面的な測量が可能になった。マルチビームが最も一般的な Bathymetry の手法だよ。(Bathymetry もまたハイドロなんとかって分野に含まれる一つらしいが、うまく水に関する工学や自然科学の体系をわかっていないや)

一方、浅水域は、より人間社会に密接に影響を与えるよ。(人間は陸に住むしな) 洪水の影響を予測するためには、河川の形状データを用いて流体シミュレーションするし、伝統的河川治水方法(聖牛)を用いた河川マネジメントでは、増水のたびに変わる河川の地形を知りたいよ。(テンマの論文を引用! 具体的に想定するケースを明確に) また、生態系にはその生物の住む3次元的地形が密接に関連するよね。(こういう構造をシた場所だと産卵しやすいとか、外敵から身を守りやすいとか) あと、Geomorphology とかの学問でも重要でしょう。(体系的知識がないのでうまくまとめたい。Geology も) このように浅水域は海でも川でも、湖でも重要だよ。(特に共同の関連で私は川を念頭においているが、)

こうした浅水域を測量するのはとっても大変だよ。日本では、5年以内に一度、日本全国の川の水深測量を行う必要があるよ。人が実際にあって、棒尺で測定するのを本当にやるけど、危険で、空間解像度は低いし、アホほど Time Consuming だし、コストもばか。

浅水域では、深海とは異なり(深海ほど低くなくても)、電磁波(光)が完全に散乱、吸収されることなく、情報を残してくれるので、Remote Sensing のテクニックが使えるよ! [21] 近年では、ALB が導入され、人に変わって測量できるよ。日本でも5年だか2年に1回だか図るよ(ここらの河川マネジメントの

資料は以前 Notion にまとめた。) LiDAR は Light Detection and Ranging の略で、光を用いて距離を測量する Passive な Remote Sensing だよ。水中で減衰しにくい緑とか青の波長域を照射し、水面で跳ね返るものと水中に潜って行くものを捉えることで、水底の形状を測量できるよ。深さもそこそこ行けるようになってきているよ。密度も正確性も、申し分ないけど、航空機の飛行コストや機材の高価さによって、継続的な高周期のモニタリングは難しいよ。Passive な Remote Sensing として、他にも Satelite ベース(プラットフォーム)で、マルチスペクトルと、水中での波長の減衰率の差から測量する手法もあるけど、どうしても経験に頼ったり、Cite-Dependency が強かったり明示的なモデル化をもとに水中の 3 次元形状を推定することはできないよ。そこそこ深い場所を大規模に、は、有効だけど、より浅い地域を高解像度に、正確には、向かないんじゃないかな(ちゃんと論文を読んだことがないので、正確か分からな。しっかり厳しく、調査して教えてほしいな? Survey 論文にいろいろ書いていたよ。) Sar を使う手法もあるけど全然わからないや。

そこで、着目するのは、写真測量だよ。Computer Vision 技術の発達により SfM とか MVS で、さらにドローンの普及によって正確な測量が誰でもできるようになったよ(商用ソフトウェア、OpenSource いっぱいあるね。近接写真測量の枠組みで話しているよ) UAV(+ RTKGPS) は、効率性、機材の安価さ、手軽な測量による高周期のモニタリングが可能だよ。

伝統的な船舶搭載型マルチビームソナー(深浅測量・音響測深)は、一定の深度がある海域においては標準的な手法であるが、水深が極めて浅い河川や海岸線付近においては、船舶の座礁リスクなどの航行不可領域の存在により、その運用は著しく制限される。近年では、小型の無人水上艇(Unmanned Surface Vehicle: USV)を用いた水深測量が注目されているが [4-5]、マルチビームの指向角の制限により、浅水域においては走査幅(Swath Width)が狭く、面的な測量を行うには時間的コストが高くなるという、非効率性の問題も生じる。一方で、航空機搭載レーザ測深(ALB: Airborne LiDAR Bathymetry)は [6]、広域かつ高精度な計測が可能であるが、導入および運用コストが極めて高く、高頻度なモニタリングには向きであるという経済的な障壁が存在する。

こうした背景の中、近年急速に普及したドローンなどの無人航空機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)を用いた写真測量(Photogrammetry)は、低コストかつ高解像度、高頻度なデータ取得が可能であることから、次世代の浅瀬測量技術として大きな期待を集めている。UAV により空撮された多視点画像から、Structure-from-Motion (SfM) [7]、および Multi-View Stereo (MVS) [8-9] を用いて 3 次元形状を復元するアプローチは、陸部においては既に広い用途で実用化されている [10-11-12]。これらの技術を水中に適用する場合、その手法は空中からの水深写真測量(Photogrammetric Bathymetry)と呼ばれ、空中から撮像した多視点画像からの水中の三次元再構成問題と捉えることができる。水深写真測量には、光の反射や、水中での光の散乱・吸収による減衰、波による被写体の歪みなどの課題が存在するが、中でも最も根本的に重要な課題として取り組まれてきたのが光の屈折(Refraction)である。

参考文献

- [1] Temma Fujii et al. “Impact of the Japanese traditional river training structure “Seigyu (Crib spur dike)” on river morphology and its geometrical changes”. In: *Nature-Based Solutions* 6 (2024), p. 100180. ISSN: 2772-4115. DOI: [10.1016/j.nbsj.2024.100180](https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100180). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772411524000715>.
- [2] Davide Pasquali and Alessandro Marucci. “The Effects of Urban and Economic Development on Coastal Zone Management”. In: *Sustainability* 13.11 (May 2021), p. 6071. ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su13116071](https://doi.org/10.3390/su13116071). URL: <http://dx.doi.org/10.3390/su13116071>.
- [3] J.R. Thomson et al. “A geomorphological framework for river characterization and habitat assessment”. In: *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 11.5 (Sept. 2001), pp. 373–389. ISSN: 1099-0755. DOI: [10.1002/aqc.467](https://doi.org/10.1002/aqc.467). URL: <http://dx.doi.org/10.1002/aqc.467>.
- [4] Francesco Giordano et al. “Integrating Sensors into a Marine Drone for Bathymetric 3D Surveys in Shallow Waters”. In: *Sensors* 16.1 (Dec. 2015), p. 41. ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s16010041](https://doi.org/10.3390/s16010041). URL: <http://dx.doi.org/10.3390/s16010041>.
- [5] Martin Kurowski et al. “Automated Survey in Very Shallow Water using an Unmanned Surface Vehicle”. In: *IFAC-PapersOnLine* 52.21 (2019). 12th IFAC Conference on Control Applications

- in Marine Systems, Robotics, and Vehicles CAMS 2019, pp. 146–151. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.298>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319321834>.
- [6] Kutalmis Saylam et al. “Airborne lidar bathymetry: assessing quality assurance and quality control methods with Leica Chiroptera examples”. In: *International Journal of Remote Sensing* 39.8 (Jan. 2018), pp. 2518–2542. ISSN: 1366-5901. DOI: [10.1080/01431161.2018.1430916](https://dx.doi.org/10.1080/01431161.2018.1430916). URL: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2018.1430916>.
- [7] Johannes Lutz Schönberger and Jan-Michael Frahm. “Structure-from-Motion Revisited”. In: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016.
- [8] Yasutaka Furukawa and Jean Ponce. “Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis”. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32.8 (Aug. 2010), pp. 1362–1376. ISSN: 0162-8828. DOI: [10.1109/tpami.2009.161](https://dx.doi.org/10.1109/tpami.2009.161). URL: <http://dx.doi.org/10.1109/tpami.2009.161>.
- [9] Yasutaka Furukawa and Carlos Hernández. *Multi-View Stereo: A Tutorial*. now Publishers Inc, 2015. ISBN: 9781601988379. DOI: [10.1561/9781601988379](https://dx.doi.org/10.1561/9781601988379). URL: <http://dx.doi.org/10.1561/9781601988379>.
- [10] Sean P. Bemis et al. “Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology”. In: *Journal of Structural Geology* 69 (Dec. 2014), pp. 163–178. ISSN: 0191-8141. DOI: [10.1016/j.jsg.2014.10.007](https://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.007). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.007>.

- [11] Christopher Gomez and Heather Purdie. “UAV- based Photogrammetry and Geocomputing for Hazards and Disaster Risk Monitoring – A Review”. In: *Geoenvironmental Disasters* 3.1 (Nov. 2016). ISSN: 2197-8670. DOI: [10.1186/s40677-016-0060-y](https://doi.org/10.1186/s40677-016-0060-y). URL: <http://dx.doi.org/10.1186/s40677-016-0060-y>.
- [12] Jakob Igihaut et al. “Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review”. In: *Current Forestry Reports* 5.3 (July 2019), pp. 155–168. ISSN: 2198-6436. DOI: [10.1007/s40725-019-00094-3](https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>.
- [13] Richard M Westaway, Stuart N Lane, and D Murray Hicks. “Remote sensing of clear-water, shallow, gravel-bed rivers using digital photogrammetry”. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67.11 (2001), pp. 1271–1282.
- [14] A. S. Woodget et al. “Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry”. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 40.1 (Aug. 2014), pp. 47–64. ISSN: 1096-9837. DOI: [10.1002/esp.3613](https://doi.org/10.1002/esp.3613). URL: <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3613>.
- [15] Toshimi Murase et al. “A Photogrammetric Correction Procedure for Light Refraction Effects at a Two-Medium Boundary”. In: *Photogrammetric engineering & remote sensing* 74.9 (Sept. 2008), pp. 1129–1136. ISSN: 0099-1112. DOI: [10.14358/pers.74.9.1129](https://doi.org/10.14358/pers.74.9.1129). URL: <http://dx.doi.org/10.14358/pers.74.9.1129>.
- [16] James T. Dietrich. “Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi - view stereo photogrammetry”. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 42.2 (Nov. 2016),

- pp. 355–364. ISSN: 1096-9837. DOI: [10.1002/esp.4060](https://doi.org/10.1002/esp.4060). URL: <http://dx.doi.org/10.1002/esp.4060>.
- [17] Alexandros Makris et al. “Refraction-Aware Structure from Motion for Airborne Bathymetry”. In: *Remote Sensing* 16.22 (Nov. 2024), p. 4253. ISSN: 2072-4292. DOI: [10.3390/rs16224253](https://doi.org/10.3390/rs16224253). URL: <http://dx.doi.org/10.3390/rs16224253>.
- [18] P. Agrafiotis et al. “SHALLOW WATER BATHYMETRY MAPPING FROM UAV IMAGERY BASED ON MACHINE LEARNING”. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W10 (Apr. 2019), pp. 9–16. ISSN: 2194-9034. DOI: [10.5194/isprs-archives-xlii-2-w10-9-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-2-w10-9-2019). URL: <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-2-w10-9-2019>.
- [19] Ben Mildenhall et al. “NeRF: representing scenes as neural radiance fields for view synthesis”. In: *Communications of the ACM* 65.1 (Dec. 2021), pp. 99–106. ISSN: 1557-7317. DOI: [10.1145/3503250](https://doi.org/10.1145/3503250). URL: <http://dx.doi.org/10.1145/3503250>.
- [20] Bernhard Kerbl et al. “3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering”. In: *ACM Transactions on Graphics* 42.4 (July 2023), pp. 1–14. ISSN: 1557-7368. DOI: [10.1145/3592433](https://doi.org/10.1145/3592433). URL: <http://dx.doi.org/10.1145/3592433>.
- [21] Jinchen He et al. “Remote sensing for shallow bathymetry: A systematic review”. In: *Earth-Science Reviews* 258 (Nov. 2024), p. 104957. ISSN: 0012-8252. DOI: [10.1016/j.earscirev.2024.104957](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104957). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104957>.